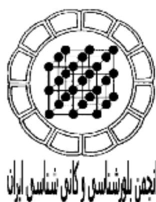
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی و یکم، شمارهٔ اول، بهار ۱۴۰۲، از صفحهٔ ۱۲۳ تا ۱۳۴



بررسی کانی‌شناسی و طیف‌سنجی پراش پرتوی ایکس رگه‌های گرافیتی در شمال_شرق توده الوند

مهرداد براتی[*1]، آرزو محمدی[1]، محمد هزاره [2]، زینب فلاح کریمی [1]

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۳/۱۸، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۶/۲۷)

چکیده: منطقه مورد بررسی در ۴۵ کیلومتری جنوب شرق همدان، در شمال شرق شهر مازندریان و شرق باتولیت الوند واقع شده است. گرافیت به دو صورت ۱) رگه‌هایی به ضخامت ۵ تا ۱۰ cm در کنار رگه‌های کوارتزیتی دودی رنگ و ۲) پراکنده در سنگ‌های دربردارنده بلورهای درشت مسکوویت، کوارتز، گارنت، آندالوزیت، کیانیت و بیوتیت در منطقه دیده می‌شود. سنگ میزبان گرافیت شیست‌های میکادار هستند. مهمترین ناخالصی همراه با گرافیت در منطقه سرسیت و مسکویت هستند. در الگوی پراش پرتوی ایکس (XRD) از نمونه‌ها، قله مربوط به گرافیت ششگوشی دیده شد. بررسی‌های دماسنجی نشان می‌دهد که ۴ نوع سیال درگیر $LCO_2+VCO_2+LH_2O$، LCO_2+VCO_2، VH_2O+LH_2O و LCO_2+VH_2O، در رگه‌های کوارتز وجود دارند. دمای همگن‌شدگی برای سیال‌های درگیر در همه نمونه‌های دو فازی (در گستره ۲۴۰-۱۵۰) با میانگین ۱۸۰°C و شوری‌ها بین ۳ تا ۱۶٫۴ درصد وزنی معادل نمک طعام برپایه سامانه $H_2O\text{-}CO_2\text{-}NaCl$ هستند. چگالی‌های محاسبه شده برای سیال‌های درگیر در کوارتز از ۰٫۸۷ تا ۱gr/cm^3 متغیر است. افزون بر این، حضور CO_2 در سیال‌های درگیر نشانگر خاستگاه گرمابی رگه‌های کوارتزیت موجود در ذخیره است. نتایج بررسی‌های سنگ‌نگاری و مشخصه‌یابی فیزیکی کانی گرافیت بیانگر تشکیل این کانی از دگرگون شدن مواد آلی موجود در رسوب‌های اولیه تا حد رخساره آمفیبولیت بوده و کانی‌سازی گرافیت موجود در ذخیره در ارتباط مستقیم با تشکیل رگه گرمابی کوارتزی با خاستگاه دگرگونی است.

واژه‌های کلیدی: *ازندریان؛ باتولیت الوند؛ گرافیت؛ سیال‌های درگیر؛ پراش پرتوی ایکس.*

مقدمه

گرافیت با فرمول شیمیایی C یک کانی اقتصادی است که بیشتر در شرایت دگرگونی و شرایط گرمابی وابسته به آن تشکیل می‌شود این کانی در صنایع روان کننده، مدادسازی، چاپ، قالب‌گیری، کاغذ کاربن و دیرگدازها کاربرد دارد. در بررسی زمین‌شناسی از منطقه مورد نظر، ۳ نهشته گرافیت- شناسی شد که نهشته ۱ بررسی شده است [۱] . وجود گرافیت در سنگ‌های فیلیتی و شیستی سبب ایجاد رنگ سیاه در آنها گردیده است، ولی به اندازه‌ای نیست که جنبه اقتصادی یابد. عمده تمرکز این کانی در رگه‌هاست. به‌نظر می‌رسد که بررسی این رگه‌ها و چگونگی تشکیل آن‌ها چشم‌اندازی در زمین- شناسی اقتصادی منطقه ارائه کند. در این پژوهش، بررسی‌های صحرایی، میکروسکوپی، تجزیه‌های شیمیایی و بررسی سیال- های درگیر، پیرامون چگونگی تشکیل گرافیت منطقه ازندریان بحث شده است.

روش بررسی و آماده‌سازی نمونه‌ها

برای بررسی‌های پتروگرافی، تعداد ۲۰ مقطع نازک میکروسکوپی از نمونه‌های تازه و غیرهوازده تهیه شد. این مقاطع با میکروسکوپ قطبشی زایس در دانشگاه بوعلی سینا بررسی شدند. برای بررسی‌های کانی‌نگاری به منظور مشخصه

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۸۳۱۵۶۶۳۲، پست الکترونیکی: barati@basu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.9.0]

[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.123]

یابی ساختاری و بافتی، تعداد ۱۵ مقطع نازک صیقلی از بلورهای گرافیت تهیه شد. ساختار بلوری گرافیت برای تعیین شرایط تشکیل و اقتصادی بودن آن اهمیت دارد که دسترسی به این مهم با انجام آنالیزهای طیف‌سنجی پرتو ایکس XRD (X-Ray Diffraction) میسر است، به این منظور ۷ نمونه گرافیتی از رگه‌ها و سنگ‌های شیستی تهیه گردید. با دستگاه APD2000 ساخت شرکت ایتال استراکچر با لامپ مس و ولتاژ 20kV و جریان 10nA و سرعت 1/min در دانشگاه بوعلی سینا شناسایی گردید. نمونه‌های به دست آمده از رگه-های گرافیت و سنگ میزبان شیستی آسیاب شده، سپس مقدار 2g از هر یک برداشته شد و از 2cc اسید هیدروفلوریک و اسید کلریدریک ٪۱۰ برای از بین بردن فازهای سیلیکاتی و کربناتی استفاده شد. پس از گذشت ۲ ساعت، نمونه‌ها با آب مقطر دو بار تقطیر، چند بار شسته شده و پودر گرافیت باقی مانده بمدت ۴ ساعت در کوره با دمای 80°C خشک شدند. تعداد چهار نمونه از رگه‌های کوارتزی کنار رگه گرافیت در نهشته ۱ برای بررسی‌های ریزدماسنجی در دانشگاه تربیت معلم انتخاب شد. برای بررسی میکروسکوپی سیال‌های درگیر از میکروسکوپ نوری زایس مدل Axioskop 40 با عدسی‌های شیئی 10X ، 20X، 60X و 100X در دانشگاه بوعلی سینا و میکروسکوپ زایس در مرکز تحقیقات و بررسی‌های مواد استفاده شد. نتایج بررسی‌های سیال‌های درگیر در نرم افزارهایی چون MAC FLINCOR با استفاده از رابطه مرجع برای سامانه‌های دوفازی تحلیل و دما، فشار، چگالی و شوری آنها محاسبه شد. داده‌ها با برنامه اکسل پردازش و با نرم افزار Corel DRAW X5 نمودارهای لازم رسم گردید. آزمایش‌های گرمایش و سرمایش با صفحه گرمایش و سرمایش لینکهام مدل THMS600 در آزمایشگاه سیال‌های درگیر دانشگاه تربیت معلم انجام شد. دقت اندازه‌گیری‌ها ±0/2°C برای دماهای کمتر از 30°C ، ±1°C برای گستره 30°C تا ۳۰۰ و ±2 برای دماهای بیش از 300°C برآورد شده است. نرخ گرمایش °C/m ۱ تا ۵ در مراحل ابتدایی گرمایش، °C/m ۰/۳ تا ۱ در دماهای نزدیک به تغییر فاز است.

موقعیت زمین شناسی

منطقه مورد بررسی از نظر جغرافیایی بین طول‌های ″۳۰´۳۰°۳۴ تا ″۴۵´۳۴°۳۴ شرقی و عرض‌های ″۳۰´۳۰°۴۸ تا ″۴۵´۳۰°۴۸ شمالی، در ورقه‌های ۱:۱۰۰۰۰۰ همدان و ملایر، در ۴۵ کیلومتری جنوب شرق همدان و در شمال شرقی شهر ازندریان بوده که بر پایه تقسیم‌بندی پهنه‌های زمین-شناسی ساختاری ایران، در پهنه سنندج - سیرجان و شرق باتولیت الوند واقع است. از سویی، این منطقه بخشی از نوار دگرگونی مهاباد- گلپایگان به شمار می‌آید. پیرامون باتولیت گرانیتوئیدی الوند، هاله دگرگونی به ضخامت چند کیلومتر تشکیل شده است که در آن، تعداد زیادی از ذخایر کانی‌های اقتصادی و صنعتی وجود دارند. گرافیت یکی از این کانی‌هاست که به‌صورت رگه‌ای و پراکنده در میان شیست‌های منطقه دیده می‌شود.

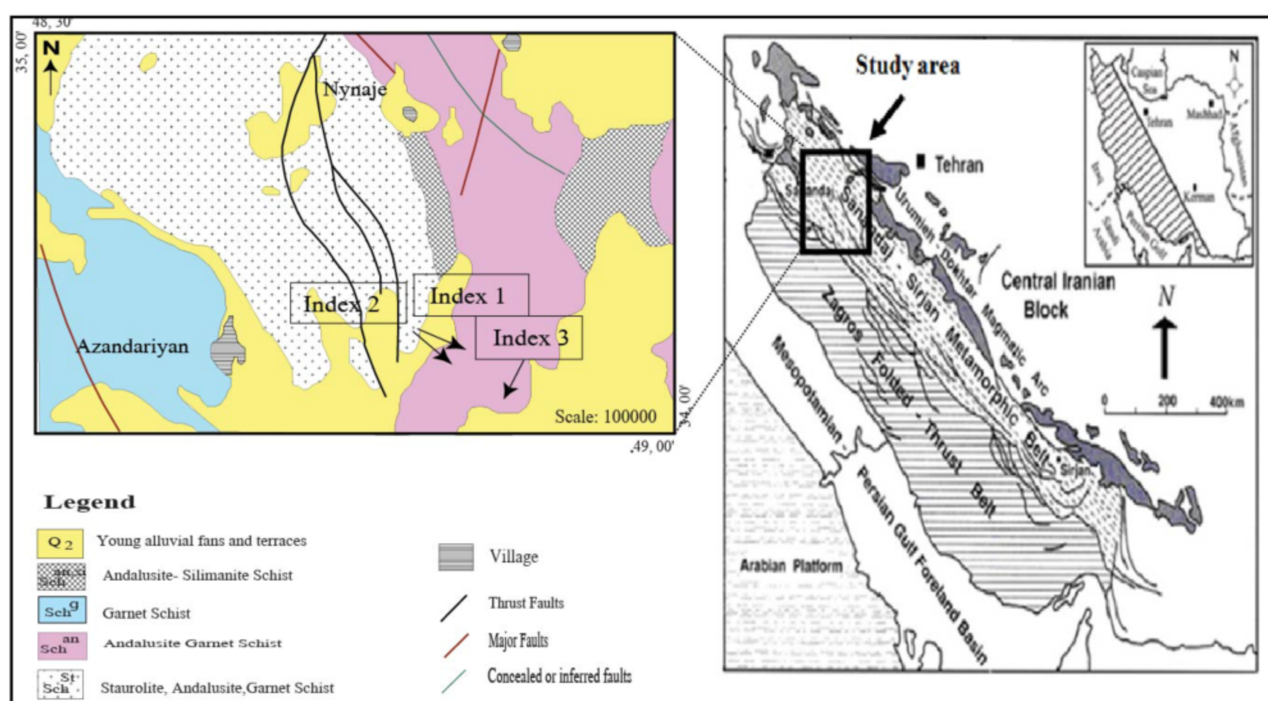
سنگ‌های دگرگونی منطقه به دو گروه اصلی سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای و مجاورتی تقسیم می‌شوند. سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای شامل شامل اسلیت، فیلت و انواع شیست هستند (شکل۱) که بیشتر در جنوب و جنوب شرق باتولیت الوند گسترش دارند و با حرکت به سمت توده نفوذی الوند، بر شدت دگرگونی مجاورتی افزوده می‌شود [۲]. سنگ‌های دگرگونی مجاورتی بیشتر شامل انواع شیست‌های لکه‌دار و هورنفلس هستند. در اثر گرمای ناشی از تزریق توده آذرین نفوذی، سنگ‌های منطقه چند بار دستخوش دگرگونی مجاورتی شده‌اند. هاله دگرگونی مجاورتی از رخساره هورنبلند – هورنفلس تا رخساره هورنبلند – پیروکسن را شامل می‌شود. این منطقه دارای تنوع سنگ‌شناسی گسترده از شیست‌هایی با ترکیب کانی شناسی متفاوت و با سن احتمالی پالئوزویک تا ژوراسیک [۳] و آبرفت‌هایی با سن کواترنری است.

زمین شناسی صحرایی منطقه

در منطقه ازندریان، گرافیت به دو صورت ۱) رگه‌هایی به ضخامت ۵ تا ۱۰ cm در کنار رگه ها و عدسی‌های کوارتزی سفید شیری تا دودی رنگ به ضخامت تا ۲،۵ m. و ۲) پراکنده در انواع سنگ‌های شیستی دربردارنده بلورهای درشت مسکوویت، کوارتز، گارنت، آندالوزیت، کیانیت، استارولیت، سیلیمانیت و بیوتیت دیده می‌شود. سنگ‌های منطقه بصورت کاملا متورق هستند. گرافیت موجود بصورت رگه‌هایی سیاه‌رنگ به ضخامت تا ۱۰ cm در راستای یک دایک کوارتزی به ضخامت ۲ m در شیست‌ها دیده می‌شود. از لبه دیواره به سمت مرکز رگه، عیار گرافیت افزایش می‌یابد. رنگ دودی

کوارتز بیشتر در اثر مواد رادیو اکتیو چون اورانیوم است، ولی با توجه به بازدیدهای صحرایی به نظر می‌رسد که میانبارهای بسیار ریز گرافیت در کوارتز سبب تغییر رنگ آن می‌گردد.

رنگ سیاه رگه گرافیتی در رگه کوارتزی اثر کرده و باعث سیاه شدن آن و تشکیل کوارتز دودی شده است از آنجا برخورد بخش دودی رگه‌های کوارتز و کوارتز شیری تدریجی است و از سیاه کامل در کنار رگه‌های گرافیتی تا شیری در فاصله حدود ۱ تا ۲ Cm تغییر میکند، ذرات گرافیت هنگام تبلور رگه کوارتز پراکنده بوده‌اند (شکل ۲ الف). تفاوت رفتاری کوارتز و گرافیت در پاسخ به تنش‌های زمین‌ساختی سبب شده است تا گرافیت با رفتار شکل‌پذیر به درون لایه‌های کواتزی در بودین‌ها با اعمال تنش‌های زمین‌ساختی تزریق گردد (شکل۲ ب). در لبه دایک کوارتزی و رگه گرافیتی، بلورهای آندالوزیت به مسکوویت تبدیل شده‌اند. از نظر شواهد ساختاری، دست کم دو نسل شیستوارگی و دو نسل ریزچین در شیست‌های میزبان دیده می‌شود (شکل ۳ الف). کانی گرافیت بصورت پراکنده همراه با کانی‌هایی چون آندالوزیت، بیوتیت، مسکوویت، کیانیت، استارولیت و گارنت دیده می‌شود. آندالوزیت گارنت استارولیت شیست و گارنت گرافیت میکاشیست از مهمترین سنگ‌های تشکیل دهنده این منطقه هستند. چند نوع از آندالوزیت در نمونه‌های دستی دیده می‌شوند که مهمترین آنها آندالوزیت‌های کشیده و چین خورده و دربردارنده صلیب کربن، به نام کیاستولیت‌ها بوده که بیانگر الگوهای هندسی منظمی از میانبارها هستند که در ارتباط با ساختار بلور میزبان آرایش یافته‌اند [۴] و بلورهای خوش وجه کیانیت درون آنها هستند. حضور یک فاز دگرگونی پیش رونده منجر به تبدیل آندالوزیت به کیانیت شده است (شکل ۳ ب). حضور گرافیت نشانگر افزایش دما در این محیط است. این آندالوزیت‌ها جدیدترین نسل آندالوزیت منطقه محسوب می‌شوند که همزمان با گرافیت‌ها تشکیل شده‌اند. این امر را می‌توان به نبود میانبار کربن در آنها و انباشت آنها در سیال نفوذی و برونزد آنها به صورت بلور گرافیت در کنار آندالوزیت نسبت داد [۵]. در سنگ میزبان همچنین، گرافیت به شکل قالبها یا انبان‌های با ضخامت ۲ تا ۵ cm و به صورت کاملا متورق دیده می‌شود (شکل ۳ پ).

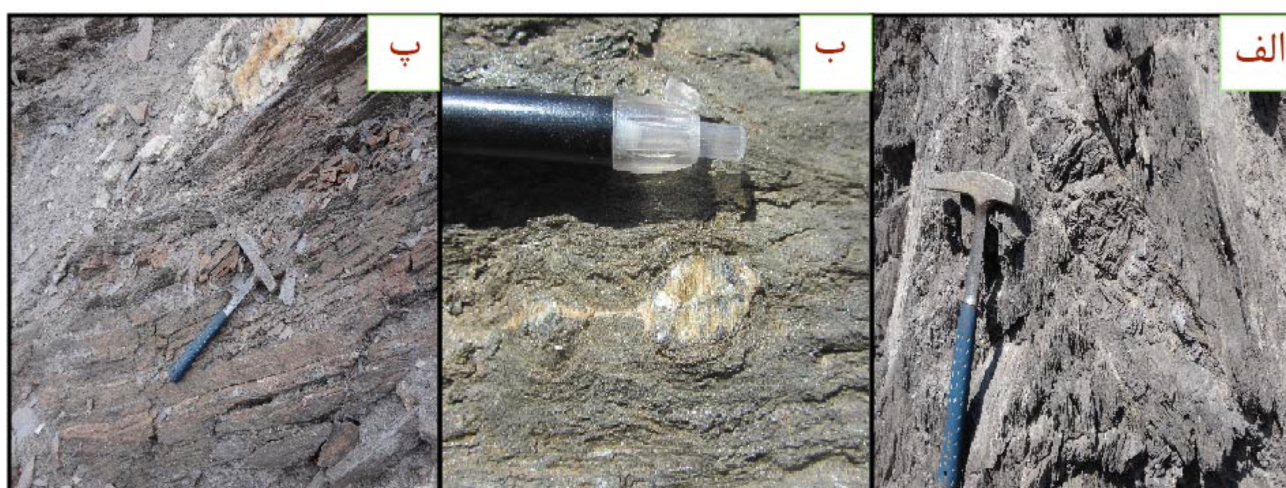


شکل۱ موقعیت زمین‌شناسی نهشته‌های گرافیت در نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی (برگرفته از مرجع [۲]) .

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.9.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.123]



شکل ۲ الف)گرافیت (بین دو خط سیاه در لبه رگه کواتز) ب) لایه‌های گرافیت و کوارتز شیری به صورت متناوب با ضخامت‌های متغیر در یک بودین (مرز بین لایه‌های کوارتز و گرافیت با خط چین‌های سبز رنگ مشخص شده است).



شکل ۳ الف) ریز چین‌ها در گرافیت شیست با لایه‌بندی ظریف ب) مقطع کیاستولیت کشیده غنی از کربن در سنگ میزبان گرافیت شیست که از اطراف تبدل به کیانیت شده است پ) انبان و لایه‌های گرافیت ضعیف هوازده شده در بین سایر لایه‌های شیستی.

بررسی‌های سنگ‌نگاری و کانی‌نگاری

بررسی میکروسکوپی مقاطع نازک مربوط به شیست‌های میزبان نشان می‌دهد که آنها گارنت گرافیت میکاشیست بوده و کانی-های تشکیل دهنده آن‌ها شامل مسکویت، بیوتیت، گرافیت، کوارتز، استارولیت، کلریت و گارنت هستند. میکاها بخش عمده مقاطع نازک را شامل شده، به صورت توالی از لایه‌های کوارتزی و لایه‌های غنی از میکا دیده می‌شوند و دارای بافت ورقه شکفتی هستند. حضور کانی گرافیت در توالی میکادار باعث تیره‌تر شدن آن گردیده است. بلورهای گرافیت و استارولیت همزمان با شیستوارگی تشکیل شده‌اند. گرافیت به صورت لایه‌های مویی در آنها دیده می‌شود. گارنت به صورت نیمه شکل‌دار تا شکل‌دار همراه با میانبارهایی از کوارتز و گرافیت حضور دارد (شکل ۴ الف). بطور کلی، بافت این سنگ‌ها پورفیری ورقه شکفتی است که شکفته‌بلورهای آن را گارنت تشکیل می‌دهد. در بررسی مقاطع نازک صیقلی از گرافیت-شیست‌ها، کانی گرافیت به صورت بلورهای تخت نیمه شکل‌دار

(با اندازه‌های بزرگ تا کوچک) تا فلسی‌شکل (شکل ۴ ب) همراه با بلورهای مسکویت، بیوتیت، آندالوزیت و کوارتز دیده می‌شود. گارنت آندالوزیت استارولیت شیست‌ها از کانی‌های گارنت، آندالوزیت، استارولیت، کیانیت، بیوتیت، مسکوویت و کانی‌های فرعی گرافیت و اکسید آهن با بافت پورفیری ورقه شکفتی تشکیل شده‌اند. شکفته بلورهای آن شامل بلورهای درشت آندالوزیت، گارنت و استارولیت هستند. بافت آندالوزیت-های اولیه به دلیل داشتن میانبارهای کربن، غربالی است. در برخی مقاطع، هاله‌هایی از گرافیت پیرامون بلورهایی چون آندالوزیت، کیانیت و گارنت دیده می‌شود که به دلیل تمایل بالای گرافیت برای تشکیل و جذب سطح شدن شکفته-بلورهاست [۴]. بلورهای استارولیت همزمان با شیستوارگی تشکیل شده‌اند و همراهی آن‌ها با کانی‌هایی چون گارنت و کیانیت شاخص دگرگونی درجه متوسط است [۶]. تبدیل بلورهای آندالوزیت به کیانیت و آندالوزیت به سیلیمانیت در بعضی از مقاطع مشاهده می‌شود. گارنت گرافیت میکاشیست‌ها دارای کانی‌های اصلی گارنت، بیوتیت، مسکوویت، کوارتز، گرافیت و اکسید آهن هستند که در آن‌ها، گرافیت هم به صورت میانبار درون درشت بلورهای مسکویت با بافت غربالی و هم همراه با بیوتیت و مسکویت دیده می‌شود. بلورهای گرافیت همراه با کانی‌های دیگری چون بیوتیت، کلریت، آندالوزیت، مسکویت و استارولیت حضور دارند. گرهک‌های اکسید آهن، به وضوح از تخریب کلریت در درون گرافیت نمایان هستند. کانی هایی چون کلینوزوییزیت، اپیدوت، اکتینولیت، کلسیت و گرافیت از یک سو (با بافت دانه‌شکفتی) و کانی‌هایی چون آندالوزیت، کیانیت، سیلیمانیت، کوارتز، استارولیت و گارنت (گرانوفلس) از سوی دیگر حضور دارند. بافت هر دو مجموعه کانیایی دانه‌شکفتی است که می‌تواند گویای حضور سه سنگ مادر مارنی، ماسه سنگی و پلیتی در این منطقه باشد [۷]. در جایی که بلورهای آندالوزیت از لبه به مسکوویت تبدیل شده‌اند، بلور کیانیت دیده می‌شود که خود دلیلی بر حضور آندالوزیت پیش از کیانیت است [۸]. در مقاطع صیقلی تهیه شده از گرافیت، این کانی بیشتر به صورت توده‌ای با میانبارهای ریزی از کانی پیریت دیده می‌شود (شکل ۴ پ). با توجه به بررسی-های صحرایی و میکروسکوپی، این منطقه بر اساس رده بندی دگرگونی ناحیه ای پیشرونده [۹]، در گستره دما و فشار متوسط قرار دارد.

توالی همبرزایی

بر اساس شواهد موجود، کانی‌زایی گرافیت در منطقه مورد بررسی به صورت رگه‌ای و پراکنده در شیست‌هایی رخ داده است که تا حد رخساره آمفیبولیت دگرگون شده‌اند و دارای ترکیب کانی شناسی و زمان تشکیل متفاوتی هستند. با توجه به حضور توالی‌های رسوبی دگرگون شده، چنین به نظر می-رسد که این گرافیت‌ها در شرایط دگرگونی و از دگرگون شدن ماده آلی همراه با این رسوب‌ها تشکیل شده‌اند و خاستگاه همزاد دارند (شکل۵).



شکل۴ الف)گارنت(Grn) در میان سلیمانیت (Sil) رشته‌ای به همراه گرافیت (Gr) سیاه رنگ لایه نازک (در نور قطبیده متقاطع، XPL) ب) پولک‌ها و ورقه‌های گرافیت سیاه رنگ درون سنگ‌های شیستی (XPL). پ) مقطع میکروسکوپی از یک گرافیت (Gr) لایه‌ای در نور بازتابی با میانبارهای پیریت (Py).

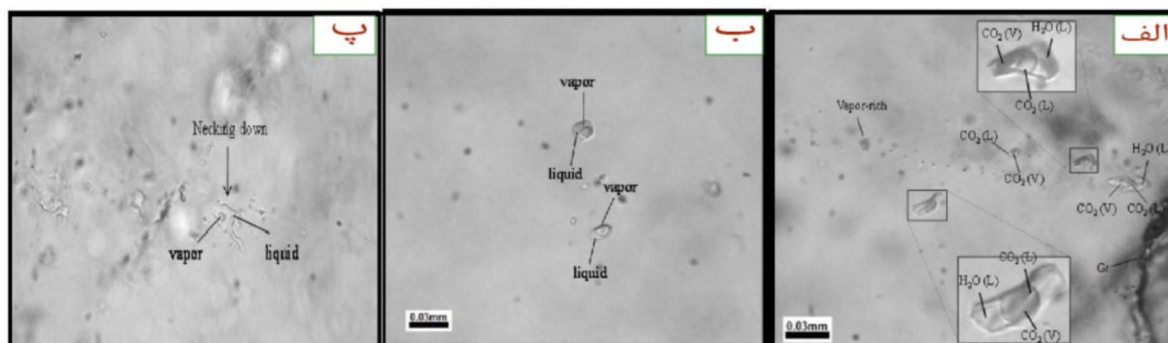
[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.9.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.123]

Mineral	Greenschist facies / Amphibolite facies
Andalusite	
Silimanite	
Kyanite	
Muscovite	
Biotite	
Chlorite	
Graphite	
Staurolite	
Quartz	
Garnet	
Magnetite	
Clinozoisite	
Calcite	
Epidote	
Actinolite	

شکل ۵ توالی همبرزایی در شیست‌های گرافیت‌دار در منطقه مورد بررسی.

بررسی سیال درگیر

تعداد چهار نمونه از رگه‌های کوارتزی در کنار رگه گرافیت و در حد امکان از بلورهای درشت، تمام شکل و کاملا شفاف کوارتز برای بررسی‌های ریزدماسنجی انتخاب شدند. اندازه سیال‌های درگیر در کانی کوارتز بسیار متغیر و در گستره کمتر از ۷ تا ۲۰ میکرون است. بررسی‌های دماسنجی برای سیال‌های درگیر بزرگتر از ۵ میکرون انجام شد. همچنین، این سیال‌های درگیر از نظر شکل ظاهری به انواع نامنظم و منظم کروی تقسیم می‌شوند. بیشتر سیال‌های درگیر در این نمونه‌ها بی‌شکل هستند. هر سه نوع سیال‌های درگیر اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب در مقاطع دیده می‌شوند. سیال‌های درگیر بررسی شده در کانی میزبان کوارتز همه از نوع اولیه هستند. از نظر محتوای درون سیال‌های درگیر، نمونه‌های کوارتز به دو دسته سیال‌های سه فازی و دو فازی تقسیم می‌شوند: سیال‌های سه فازی شامل فازهای $LCO_2+VCO_2+LH_2O$ بوده که نزدیک به ٪۷۰ سیال‌های مورد بررسی از این نوع هستند. در این نوع سیال‌های درگیر، فاز مایع همراه با فاز حباب گاز وجود دارد. بیشترین حجم سیال درگیر را فاز مایع تشکیل می‌دهد. این سیال‌های درگیر دارای اندازه ۱۰-۲۰ میکرون و از نوع اولیه هستند. درجه پرشدگی (F) برای این نوع سیال‌ها ۸۵ تا ٪۹۵ است (شکل۶ الف). سیال‌های دو فازی شامل سه زیررده LCO_2+VCO_2، VH_2O+LH_2O و LCO_2+VH_2O هستند. در این نوع از سیال‌ها نیز فاز مایع غالب است و درجه پرشدگی به بیش از ٪۸۰ می‌رسد (شکل۶ ب). پدیده دم بریدگی و نشت سیال که طی آن یک سیال درگیر نازک صاف یا بلند و الواری (Tabular) به منظور تغییر شکل برای رسیدن به تعادل و انرژی سطحی کمتر، مساحت دیواره خود را کم کرده و منجر به سیال‌های درگیری با شکل منظم‌تر یا بلور منفی و اندازه کوچکتر می‌شود، در کانی کوارتز دیده می‌گردد (شکل ۶ پ).



شکل۶ انواع سیال‌های درگیر دیده شده در نمونه‌های کوارتز منطقه مورد بررسی: الف) سه فازی (H_2O-CO_2-NACL) ب) دو فازی (LCO_2+VCO_2 ، VH_2O+LH_2O ، LCO_2+VH_2O) پ) پدیده دم بریدگی.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.9.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.123]

ریزدماسنجی سیال‌های درگیر

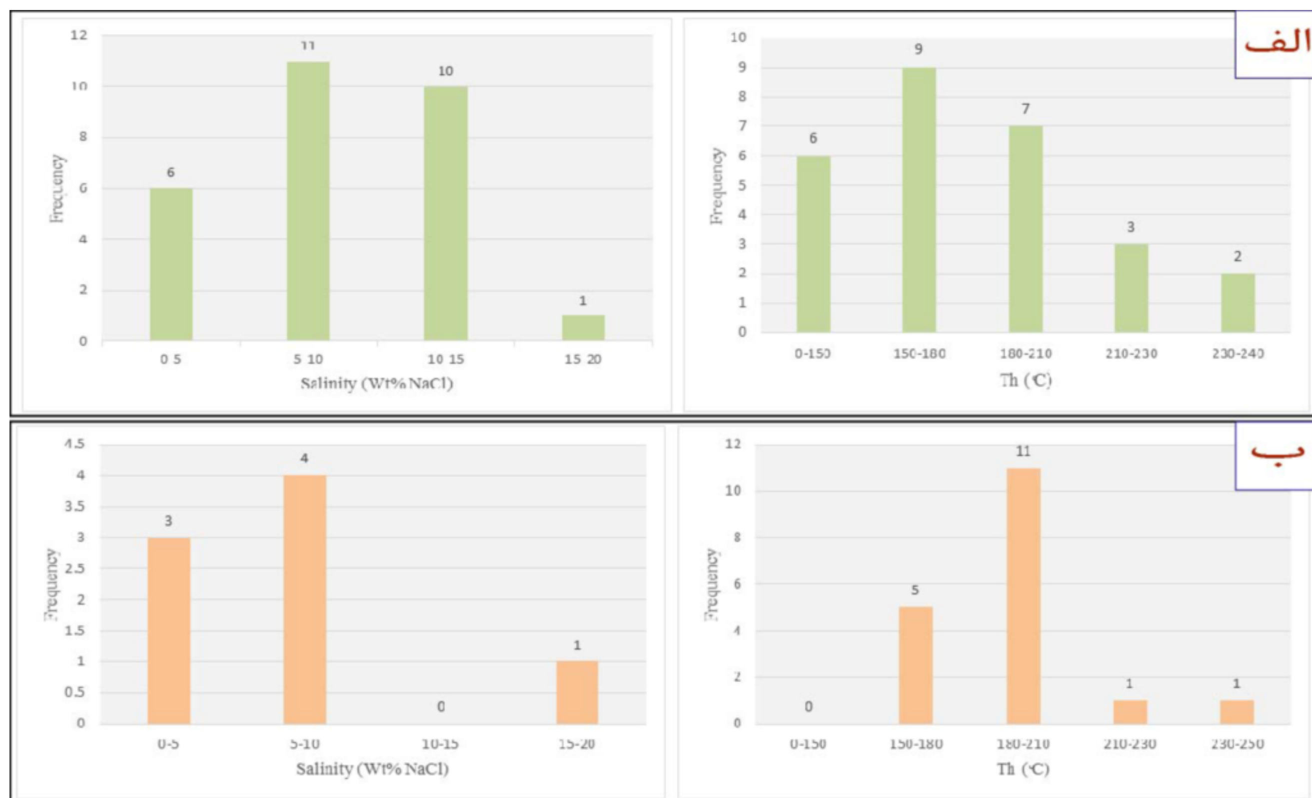
این بررسی‌ها شامل دو بخش گرمایش و سرمایش هستند. در این راستا، نمونه‌ها نخست تا زیر نقطه انجماد سرد و سپس گرم شدند، در این آزمایش‌ها، دمای ذوب CO_2 جامد (Tm_{CO2})، دمای انجماد سیال‌های درگیر H_2O- NaCl (Tm_{ice})، دمای پایانی ذوب کلتریت (Tm_{clat})، دمای همگن‌شدگی فاز CO_2 (Th_{CO2}) و دمای همگن‌شدگی کلی (T_h) سیال‌های درگیر اندازه‌گیری شد. در مرحله گرمایش، دمای همگن‌شدگی اندازه-گیری شده و برای تعیین شوری، چگالی و عمق به دام افتادن سیال‌ها استفاده می‌شود. این بررسی‌ها برای ۵۱ سیال درگیر ۳ فازی و ۲ فازی در کانی کوارتز از نهشته۱ انجام شد. براساس نتایج به دست آمده، (جدول ۱) دمای همگن‌شدگی در گستره بین 150-240 ^{o}C با میانگین ۱۸۰ ^{o}C است.

جدول۱ نتایج بررسی سیال‌های درگیر درکوارتزهای منطقه (آشکار نشده= ND).

چگالی	شوری(wt%NaCl)	Th(°c)	نوع	منشا	اندازه(Mm)	شماره نمونه
۰/۹	۳	۱۴۷	L1+L2+V	p	۱۲	Q1-1
۰/۹	۵	۲۲۱	L1+L2+V	p	۱۰	Q1-2
۰/۹۲	۵/۳	۱۳۲	L1+L2+V	p	۸	Q1-3
۰/۹	ND	ND	L+V	s	۱۰	Q1-4
۰/۹۴	۷/۸	۱۶۵	L1+L2+V	s	۱۰	Q1-5
۰/۹	ND	ND	L+V	p	۱۵	Q1-6
۰/۹	ND	ND	L+V	p	۱۰	Q1-7
۰/۹۳	۶/۱	۱۶۵	L1+L2+V	p	۱۰	Q1-8
۰/۹۲	۶/۳	۲۰۵	L1+L2+V	p	۲۰	Q1-9
۰/۹۶	۶/۲	۱۵۴	L+V	p	۱۲	Q1-10
۰/۹	۳/۵	۱۸۸	L+V	ps	۱۲	Q1-11
۰/۹۳	۳	۱۴۳	L1+L2+V	s	۱۰	Q1-12
۰/۹۷	۱۲/۸	۱۳۳	L1+L2+V	p	۱۰	Q1-13
۰/۹۵	۸/۹	۱۷۸	L+V	p	۱۵	Q1-14
۰/۹۵	۱۱	۱۵۶	L1+L2+V	ps	۱۵	Q1-15
۰/۸۷	ND	ND	L+V	ps	۱۵	Q1-16
۰/۸۸	ND	ND	L+V	p	۱۵	Q1-17
۰/۹۲	۶/۳	۱۴۵	L1+L2+V	p	۱۵	Q1-18
۰/۹۱	۱۱/۱	۱۴۶	L1+L2+V	p	۱۲	Q2-1
۰/۹۶	۱۶/۴	۱۷۸	L1+L2+V	p	۱۰	Q2-2
۰/۹	ND	۱۷۴	L+V	p	۱۵	Q2-3
۰/۹	ND	۱۹۸	L+V	p	۱۲	Q2-4
۰/۹	ND	۱۸۶	L+V	s	۱۱	Q2-5
۰/۹۴	۱۴/۳	۲۳۴	L1+L2+V	p	۱۰	Q2-6
۰/۹۳	۹/۸	۱۸۷	L1+L2+V	p	۱۰	Q2-7
۰/۹۱	ND	۲۰۵	L+V	p	۱۵	Q2-8
۰/۹۴	۱۳	۱۷۸	L1+L2+V	ps	۱۲	Q2-9
۰/۹۱	ND	۱۹۶	L+V	ps	۱۷	Q2-10
۰/۹۲	۱۱/۷	۱۸۹	L1+L2+V	ps	۱۷	Q2-11
۰/۹۲	۸/۶	۱۷۷	L1+L2+V	p	۱۷	Q2-12
۱	۱۸	۱۹۰	L+V	p	۱۵	Q2-13
۰/۹۳	۹/۵	۲۲۱	L1+L2+V	p	۱۲	Q3-1
۰/۹	ND	۱۸۹	L+V	p	۱۰	Q3-2
۰/۹	۸/۱	۲۳۱	L1+L2+V	p	۱۰	Q3-3
۰/۸۶	۴/۴	۱۷۸	L1+L2+V	p	۱۰	Q3-4
۰/۹۲	۳/۳	۱۷۶	L1+L2+V	p	۱۰	Q3-5
۰/۹	ND	۱۹۵	L+V	s	۱۵	Q3-6
۰/۹۱	۸/۵	۲۰۵	L1+L2+V	p	۱۵	Q3-7
۰/۹۲	۱۲/۸	۲۱۳	L1+L2+V	p	۱۵	Q3-8
۰/۹۱	۱۱/۷	۱۷۸	L1+L2+V	p	۱۵	Q3-9
۰/۹	ND	۱۸۹	L+V	p	۱۵	Q3-10
۰/۹۳	۵/۶	۱۷۸	L+V	s	۱۵	Q3-11
۰/۹۱	۴/۳	۱۸۳	L+V	s	۶	Q3-12
۰/۹۳	۱۱	۱۹۵	L1+L2+V	p	۸	Q4-1
۰/۹۱	ND	۲۰۷	L+V	p	۱۲	Q4-2
۰/۹۲	ND	۲۱۷	L+V	p	۱۳	Q4-3
۰/۹۵	۱۵	۱۹۷	L1+L2+V	ps	۱۰	Q4-4
۰/۸۵	۵	۲۴۳	L+V	p	۱۵	Q4-5
۰/۹	۳/۵	ND	L1+L2+V	s	۱۰	Q4-6
۰/۹۲	۹/۸	۱۸۷	L1+L2+V	p	۸	Q4-7
۰/۹۳	۵/۱	۱۷۶	L+V	p	۸	Q4-8

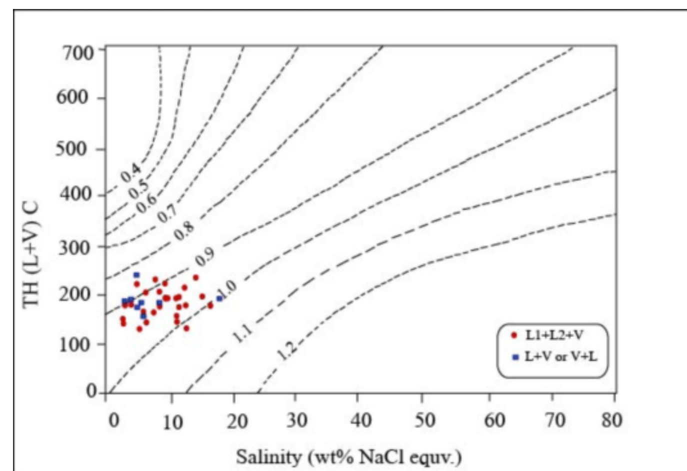
[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.9.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.123]

با توجه به شواهد (صحرایی و سنگ‌نگاری) جوشش در منطقه مورد بررسی می‌توان این دما را به عنوان دمای تشکیل کانی یا به عبارتی دمای به دام افتادن سیال کانه‌ساز در نظر گرفت. گفتنی است که دمای همگن‌شدگی در سیال‌های دو فازی به طور میانگین 190°C و در سیال‌های سه فازی، در گستره 150 -240°C است (شکل ۷). بر پایه دمای پایانی ذوب یخ و نمودارهای مختلف چون نمودار مرجع [۱۰]، می‌توان شوری سیال را تعیین کرد. شوری محاسبه شده برای سیال‌های ۲ فازی و ۳ فازی بین براساس نمودار مرجع [۱۱] ۰٫۸ تا ۱ gr/Cm^3 است (شکل ۸). شوری سیال‌های سه فازی CO_2 دار که Th_{CO2} و Tm_{clat} آنها اندازه‌گیری شده است، به روش مرجع [۱۲] محاسبه گردید. شوری سیال‌های درگیر گستره ۳ تا ۲۰ درصد وزنی معادل نمک طعام (میانگین ۱۰٪ وزنی نمک طعام) را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر شوری متوسط تا پایین به دست آمده برای سیال‌های درگیر، می‌توان نتیجه گرفت که سیال کانه‌ساز در یک مرحله تزریق شده است. براساس شکل ۹ و میانگین دمای همگن‌شدگی (۱۸۰ °C)، فشار نزدیک به ۱۸۰ بار و عمق کمتر از ۱ کیلومتر برای سیال‌ها به دست آمد. صرفنظر از شرایط به دام افتادن بر پایه داده‌های دمای همگن شدن و شوری، چگالی سیال‌های درگیر نمونه‌های بررسی شده به طور میانگین $0/9\ gr/cm^3$ به دست آمد. براساس شکل ۹ الف [۱۰]، فشار تشکیل سیال‌های درگیر برای هر دو فاز مورد بررسی کمتر از ۵۰bar مشخص گردید. برپایه شکل ۹ ب [۱۱] نیز، فشار تشکیل دو فاز سیال‌های درگیر مورد بررسی کمتر از ۱۰۰bar به دست آمد که تاییدی بر فشار کم در زمان تشکیل سیال‌های درگیر است. سیال‌های کانه‌ساز از نظر زمین‌شیمیایی بیشتر از دو نوع کلریدی و سولفیدی هستند. برای تعیین ترکیب زمین‌شیمیایی سیال سازنده رگه‌ها از نمودار شکل ۱۰ [۱۳] استفاده شد. این نمودار که بر اساس شوری و دمای همگنی سیال رسم شده دارای دو محیط سولفیدی و کلریدی است که با جابایی داده‌ها در آن، مشخص شد که سیال سازنده بیشتر دارای کمپلکس‌های سولفیدی بوده است. بنابراین حضور سولفیدها از جمله پیریت. به همراه گرافیت مانند شکل ۴ پ قابل تصور است.

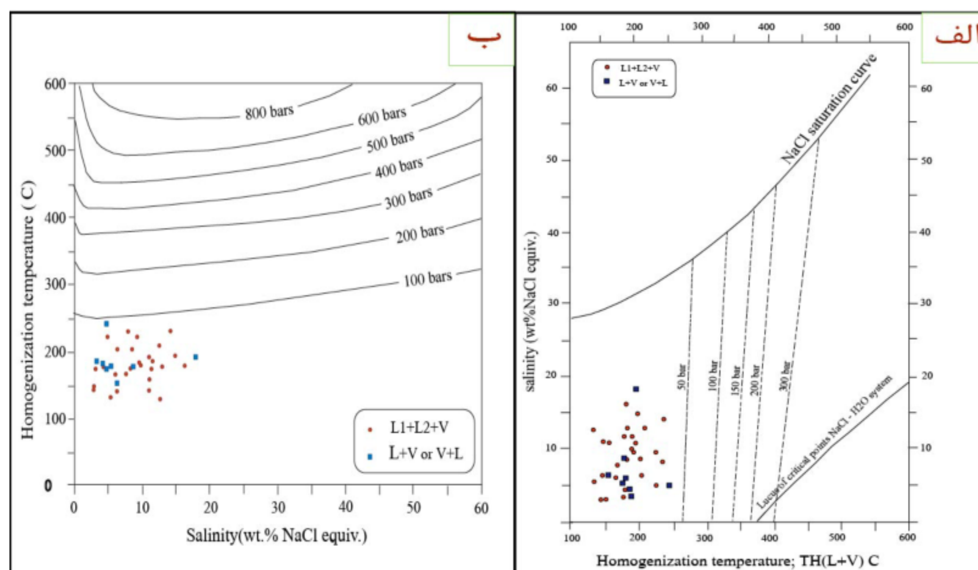


شکل ۷ نمودارهای ستونی دمای همگن‌شدگی و شوری سیال‌های درگیر الف) سه فازی ب) دو فازی.

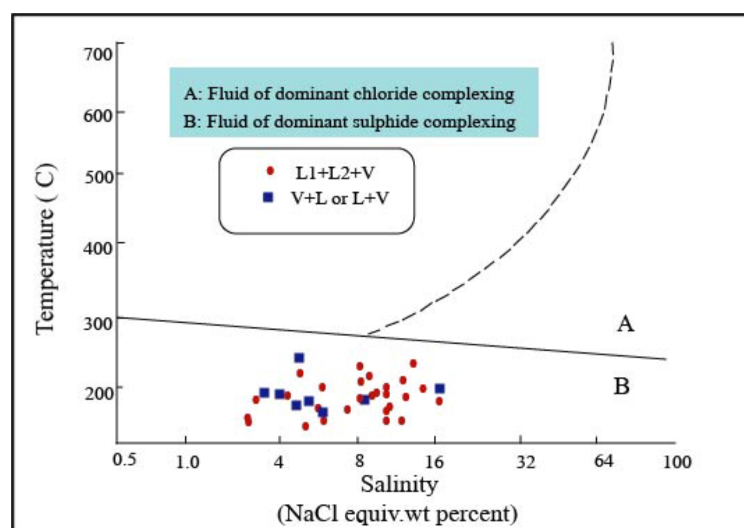
[DOR: 20.1001.1.17263689.1402.31.1.9.0]
[DOI: 10.52547/ijcm.31.1.123]



شکل۸ نمودار دوتایی دمای همگن- شوری [۱۴] برای تعیین چگالی سیال‌های درگیر.



شکل۹ نمودارهای دمای همگن‌شدگی نسبت به شوری برای تعیین الف) فشار تشکیل سنگ [۱۰] و ب) فشار تشکیل سیال‌های درگیر [۱۱].



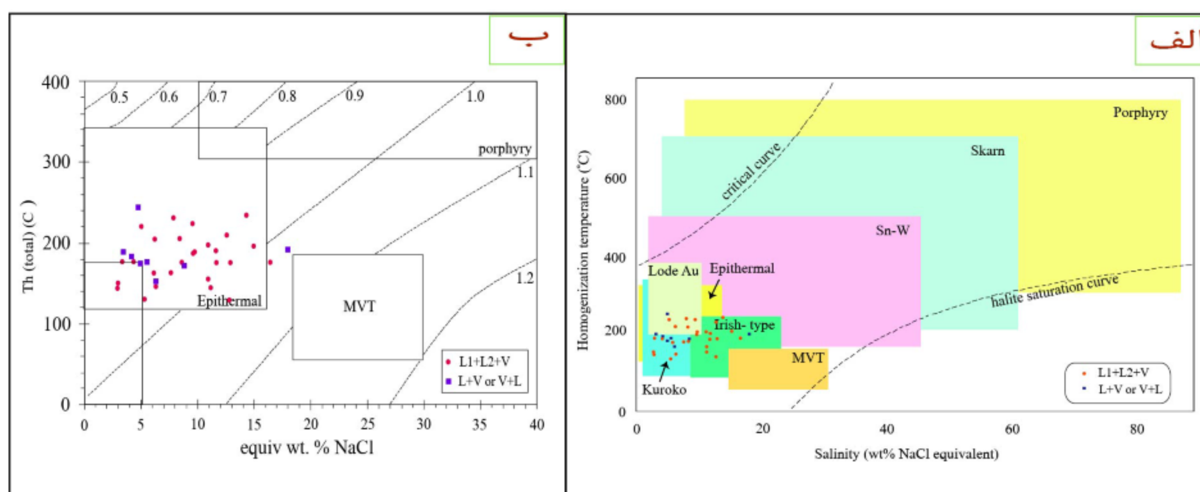
شکل ۱۰ نمودار دوتایی شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی برای تعیین کمپلکس آنیونی غالب [۱۳].

تعیین محیط تشکیل

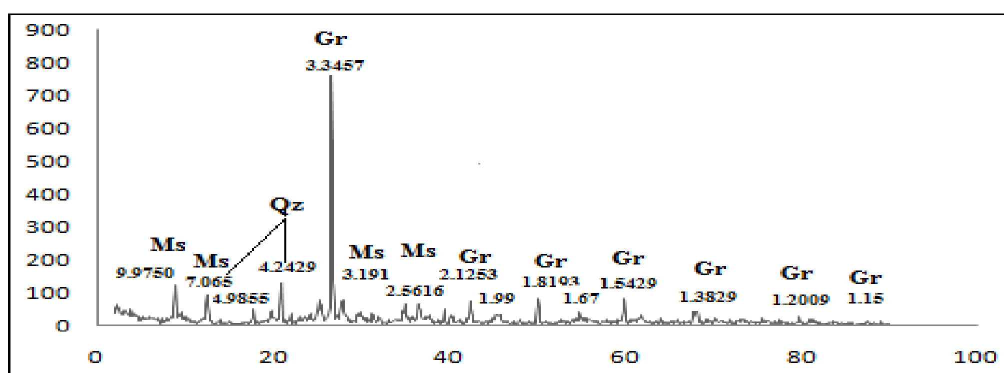
بررسی‌های بسیاری پیرامون محیط تشکیل کوارتز و گرافیت موجود در رگه‌ها در سنگ‌های دگرگونه براساس سیال‌های درگیر انجام نشده است، ولی می‌توان از مدل‌های کلی ارائه شده توسط پژوهشگران استفاده کرد. ویکینسون [۱۴] بر پایه دو پارامتر شوری و دمای همگنی، ۸ نوع کانساری مشخص کرده است (شکل ۱۱ الف). داده‌های مربوط به هر دو نوع سیال درگیر مورد بررسی بیشتر در بخش فراگرمایی قرار میگیرند. هس [۱۵] نیز براساس این نمودار ۳ نوع ذخیره مشخص کرد که داده‌های این پژوهش بیشتر در بخش فراگرمایی جایابی می‌شوند (شکل ۱۱ ب).

تعیین ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری گرافیت

گرافیت با ساختارهای ششگوشی و لوزی رخ کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف دارد. ساختار بلوری این کانی برای تعیین شرایط تشکیل و اقتصادی بودن آن اهمیت دارد که شناسایی آن با طیف‌سنجی پرتو ایکس (XRD) از بلور گرافیت ممکن است. به دست آوردن الگوی XRD با کیفیت بالا از گرافیت به دلیل پایین بودن ضریب جذب کربن، که عامل مهمی در ایجاد خطا، جابجایی و پخش قله‌ها بوده، بسیار مشکل است. از سویی، آماده‌سازی نمونه‌های گرافیت پیش از انجام پراش نیز مشکل است [۱۶]. بر این اساس، اغلب به قله (۰۰۲) که شدیدترین قله کانی گرافیت است توجه شده و همه محاسبات از جمله برای تعیین اندازه بلوری، دمای تشکیل و درجه گرافیتی شدن بر پایه آن انجام می‌شود. الگوی XRD یک نمونه گرافیت شیست منطقه در شکل ۱۲ نشان داده شده که دارای ناخالصی سرسیت است. وجود قله بیشینه در ۲۶ درجه از مشخصه‌های گرافیت‌های دگرگونی و تبلور در سامانه ششگوشی این کانی است. علت جلای درخشان این گرافیت‌ها نیز وجود ناخاصی سرسیت در آنهاست.



شکل ۱۱ الف) نمودار دوتایی شوری – دمای همگن‌شدگی برای تعیین الف) نوع کانه‌زایی رگه‌های گرافیتی [۱۴] و ب) محیط تشکل رگه‌های گرافیتی [۱۵].



شکل۱۲ الگوی XRD یک نمونه گرافیت شیست از منطقه مورد بررسی (Ms: مسکوویت و Gr: گرافیت).

برداشت

گرافیت به دو صورت رگه‌ای و فلسی در سنگ‌های دگرگونه شرق باتولیت الوند تا رگه‌های کوارتز گرافیت در این منطقه یافت می‌شود که این رگه‌ها می‌توانند ذخایر مناسبی از گرافیت باشند. این گرافیت‌ها اغلب جلای براق دارند که نشانه حضور سرسیت به همراه گرافیت است. برخوردگاه گرافیت و کوارتز در این رگه‌ها تیز بوده و کوارتر کنار گرافیت دودی است که نشانگر نفوذ کربن به صورت میانبار در کوارتز است. بررسی سیال درگیر در آنها ۴ نوع سیال درگیر $LCO_2+VCO_2+LH_2O$، LCO_2+VCO_2، VH_2O+LH_2O و LCO_2+VH_2O را نشان داده است. حضور سیال‌ها و بخار غنی از CO_2 گویای خاستگاه دگرگونی سیال‌ها از شیست‌های کناری است. نتایج سیال‌های درگیر بیانگر متوسط دمای همگن شدگی $180\ ^{\circ}C$ و شوری معادل ۱۰ درصد معادل وزنی نمک طعام است. فشار نزدیک به ۱۸۰ بار و عمق کمتر از ۱ کیلومتر برای سیال‌ها به دست آمد. چگالی سیال‌های درگیر نمونه‌های بررسی شده به طور میانگین $0/9\ gr/cm^3$ تعیین شد که با نوعی سیال پایه سولفیدی همخوانی دارد که حضور پیریت در آنها نیز تاییدی بر این امر است؛ از این رو، طلا نیز ممکن است در این رگه‌ها وجود داشته باشد. به نظر می‌رسد که رگه‌های کوارتز گرافیت از یک سیال دگرگونه غنی از سیلیس و کربن در دمای کم در گستره فراگرمایی ته‌نشست شده است. آمیختگی دو سیال غنی از Si و C سبب جدایش این دو سیال و تبلور جداگانه کوارتز و گرافیت در کنار هم شده است. حرکت‌های زمین ساختی سبب به همریختگی لایه‌های کوارتز گرافیت شده و لایه‌های گرافیت به دلیل ویژگی شکل پذیری و نوعی حالت خمیری بین لایه‌های کوارتز تزریق شده و توالی رگه‌های کوارتز، گرافیت را در بعضی از نقاط ایجاد کرده‌اند. الگوهای XRD نشان دهنده حضور سرسیت به همراه گرافیت ششگوشی در این منطقه هستند.

قدردانی

نویسندگان از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا-همدان بابت تامین کلیه هزینه‌ها تشکر می‌نمایند.

مراجع

[1] Stocklin J., *"Structural History and Tectonic of Iran",* A Review. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, USA, 52, 1229-1258.

[2] Eghlimi B., *"Description of the 1: 100000 quadrangle map of Hamedan",* Geological Survey of Iran (1379).

[3] Brown P.E., Lamb W.M., *"P-V-T Properties of Fluids in the System CO2-H2O-NaCl: New Graphical Presentations and Implication for Fluid Inclusions Studies",* Geochimica et Cosmochimica Acta, 53, 1209-1221. http://dx.doi.org/ 0.1016/0016 - 7037(89)90057-4

[4] Barker A. j., *"Introduction to metamoerphic texture and microstructures*", Blackie. New York, 162P (1990).

[5] Tsuchiya N., Suzuki S., Chida T., *"Origin of graphite in the Oshirabetsu gabbroic body, Hokkaido Japan*", journal of mineralogy, petrology and economic geology,V.68,(1991) pp.246-272.

[6] Klein C., Hurlbut C.S., *"Manual of Mineralogy*", Jhon Wiley & Sons (1999).

[7] Sepahi Gro A., *"Introduction to metamorphic petrology",* Noor Elm Publications (2005), 211 pages.

[8] Shahabpour J., *"Economic Geology",* Shahid Bahonar University of Kerman Publications (2008), 509 pages.

[9] Miyashiro A., *"Metamorphic Petrology",* UCL press. London. 404PP

[10] Roedder E., *"Fluid inclusions",* 12. Mineralogical Society of America, Reviews in Mineralogy, Virginia, 646 pp.

[11] Becker, S.P., Fall A., Bodnar R.J., *"Synthetic fluid inclusions. XVII. PVTX properties of high salinity H_2O–NaCl solutions (>30 wt% NaCl): application to fluid inclusions that homogenize by halite disappearance from porphyry copper and other hydrothermal ore deposits*", Econ. Geol. 103, 539-554 (2008).

[12] Diamond L. W., *"Fluid inclusion evidence for P-V-T-X evolution of hydrothermal solutions in Late-Alpine gold-quartz veins at Brusson, Val d'Ayas, NW Italian Alps*", American Journal of Science, 290 (1990) 912-958

[13] Pirajno F., *"Hydrothermal processes and mineral system",* Springer Science, New York, 1273 pp (2009).

[14] Wilkinson J.J., *"Fluid inclusion in hydrothermal ore deposites*", Lithos, 55(1) (2001) 229- 272.

[15] Hass J.L. *"The Effect of Salinity on the Maximum Thermal Gradient of a Hydrothermal System at Hydrostatic Pressure*", Economic Geology, 66 (1971) 940-946.

[16] Howe J.Y., Kawn C.J., Jones L.E., Ow H., *"Improved crystallographic data for graphite",* Powder diffraction, v. 18 (2003) pp. 150.154.